

Prof. dr hab. inż. Wojciech Jarzyna
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384339; e-mail: w.jarzyna@pollub.pl

Lublin, 23.12.2022 r.

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia..... 10-01-2023
Zarejestrowano pod nr
Podpis *akt*

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. JAKUBA HACHLOWSKIEGO

PT. „PRZEKSZTAŁTNIK REZONANSOWY Z PRZEŁĄCZANYM KONDENSATOREM DO KONTROLI NAPIĘĆ W GAŁĘZI SZEREGOWO POŁĄCZONYCH KONDENSATORÓW”

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie z dnia 29 września 2022 r.

Recenzja opracowana została zgodnie z wymaganym układem wskazanym w umowie.

1. Ocena problematyki rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy opracowania energoelektronicznego modułu do równoważenia napięć w gałęzi z szeregowo połączonymi kondensatorami. Zagadnienie to jest ważne ze względu na jego przewidywane zastosowania w wielopoziomowych układach przekształtnikowych. Dokładność równoważenia napięć na kondensatorach, odgrywa bowiem kluczową rolę w uzyskaniu wysokich parametrów pracy tych nowoczesnych przekształtników, które obecnie są intensywnie rozwijane w wielu czołowych ośrodkach naukowych i mają zastosowanie zarówno w układach napędowych jak i rozproszonych układach generacji.

W mojej opinii wybór tematyki rozprawy jest bardzo celny i ważny dla rozwoju techniki przekształtników wielopoziomowych.

2. Ocena układu rozprawy w tym informacje o jej częściach składowych

Oceniana rozprawa doktorska napisana została w języku angielskim, a jej oryginalny tytuł to: *Switched capacitor resonant converter for control of voltage sharing on series-connected capacitors*. Merytoryczna część pracy wraz z wykazem literatury i krótkimi załącznikami liczy 125 stron. Informacje formalne takie jak streszczenie, oznaczenia i spis treści, numerowane są cyframi rzymskimi I-XII.

Praca skomponowana jest z zachowaniem wymaganej logicznej struktury odpowiadającej rozprawom naukowym. We wstępie przedstawiona jest motywacja podjęcia tematu, która wynika z potrzeby rozwijania układów równoważących napięcia dla wielopoziomowych układów falowników NPC. Autor wyjaśnił, że technologie z wielopoziomowymi falownikami napięcia charakteryzują się bardzo konkurencyjnymi własnościami, m.in. w zakresie, jakości napięcia, sprawności, niskich wartości współczynnika THD i zmniejszonych wymagań napięciowych względem tranzystorów. Z tego powodu przewiduje, że technologie te będą pojawiać się w komercyjnych układach, w tym układach generacji fotowoltaicznej. Warunkiem osiągnięcia zamierzonych wysokich

parametrów pracy jest zapewnienie na ich wejściu zbalansowanego źródła napięciowego. Niedotrzymanie wymaganego ze względu na liczbę poziomów podziału napięć, ogranicza uzyskanie zalet wielopoziomowych falowników. Wymienione argumenty to tylko część powodów, które dla Autora rozprawy stały się motywacją podjęcia przez Niego tytułowych badań opisanych w rozprawie doktorskiej.

Poza przedstawioną motywacją, w rozdziale 1 scharakteryzowana jest również struktura pracy oraz sformułowane są jej cele badawcze. Taki układ pozwala uzyskać dobrą organizację tekstu i zachować logiczny podział pracy. W końcowych częściach tego rozdziału przedstawiona jest również typowa dla początkowych części rozpraw analiza i ocena stanu wiedzy. Składa się na nią przegląd badań nad technikami równoważenia napięcia szeregowo połączonych elementów magazynujących energię. Przytoczono kilka artykułów, które wykorzystują technikę przełączania rezonansowego oraz opis wysokosprawnych tranzystorów polowych z azotku galu, mogących pracować z bardzo dużą częstotliwością i to przy konkurencyjnych gęstościach prądu.

Wprowadzeniem do własnych rozwiązań jest rozdział drugi. Autor podaje w nim podstawowe topologie przetwornic z przełączalnymi kondensatorami, wprowadza czytelnika w zagadnienie przełączania rezonansowego oraz powielania napięć. Doktorant ogranicza się tu do podstawowych treści, które stanowią bazę do części trzeciej rozprawy, w której przedstawiona jest koncepcja i zasada działania przetwornicy równoważącej napięcia na szeregowo połączonych kondensatorach. Koncepcja ta stanowi rozwinięcie rozwiązania, którego Doktorant jest współautorem, a które zostało zgłoszone w postaci czterech patentów zamieszczonych w czternastym numerze Biuletynu Urzędu Patentowego w 2022 roku.

W ślad za przedstawioną topologią i opisem matematycznym, w rozdziale czwartym przedstawiony jest model symulacyjny przetwornicy, a zaprezentowane wyniki symulacji potwierdzają przyjętą koncepcję. Wnioski z tego posłużyły do wykonania stanowiska badawczego, którego parametry, schemat oraz wyniki testów udowadniają, że zaproponowana topologia balansera działa zgodnie z oczekiwaniami, a napięcie pomiędzy kondensatorami jest wyrównywane poprzez gałąź rezonansową. Oczekiwane rezultaty w zakresie modyfikacji bramki sterownika zostały potwierdzone. W zamian, za nieznaczną komplikację modelu przełączania, zmniejszono złożoność płytki drukowanej, w tym liczbę montowanych na niej komponentów. Ten zmodyfikowany układ balansera jest w dalszej części pracy rozwiązaniem, na którym wykonywane są badania w zakresie realizacji celów rozprawy.

Potwierdzeniem aplikacyjnym opracowanego układu jest zastosowanie go w jednofazowym siedmiopoziomowym falowniku napięcia NPC (rozd. 5). Doktorant opracował odpowiednie algorytmy sterowania dla dwóch przykładowych konfiguracji. Ich wprowadzenie potwierdziło spodziewane rezultaty związane z możliwością powielenia napięcia DC na dwóch zewnętrznych kondensatorach zasilanych przez układ SCABC. Rzetelnie przedstawione wyniki wskazują również na powstawanie efektów niepożądanych. Są nimi np. oscylacje napięcia na kondensatorach powielających, które Autor tłumaczy istnieniem niezerowych wartości rezystancji tranzystora w stanie załączenia oraz niezerowych napięć przewodzenia diod.

W rozdziale szóstym Doktorant badał możliwości odsprężnienia drugiej harmonicznej prądu w obwodzie źródła zasilania DC. Zjawisko to wpływa negatywnie w szczególności na pracę baterii elektrochemicznych. Do rozwiązania zaproponowano dwie metody. Do ograniczenia poziomu prądu o częstotliwości 100 Hz zastosowano aktywny układ kompensacji, który pulsacjami prądu doładowywał wybrane grupy kondensatorów. W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano oczekiwane zmniejszenie prądu. Negatywnym efektem jest natomiast pojawienie się pulsacji napięcia w kondensatorach przejmujących energię pulsacji.

Omówienie uzyskanych rezultatów z przeprowadzonych badań, wymienienie osiągniętych celów i rezultatów podane są w rozdziale siódmym. Autor podsumował w nim uzyskane wyniki oraz uzasadnił swoją opinię o spełnieniu postawionych celów pracy.

3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Wykaz bibliograficzny, podobnie jak w wielu monografiach, podzielony został na części odpowiadające poszczególnym rozdziałom. Do rozdziału pierwszego przyporządkowano 68 pozycji do drugiego 22, a dla kolejnych 3+6 odpowiednio 6, 1, 7 i 12. Tak duża liczba pozycji przyporządkowana do rozdziału pierwszego wynika z jego roli polegającej m.in. na określeniu stanu wiedzy w zakresie przedmiotu rozprawy.

Z pracą dokorską związane są również publikacje autora, które wymienione są na stronie VII dysertacji, a składają się na nie:

- artykuł opublikowane w czasopiśmie Energies mdpi (2022)
- artykuł opublikowany w czasopiśmie Power Electronics and Drives (2018)
- referat konferencyjny EPE 2019
- cztery zgłoszenia patentowe opublikowane w Biuletynie UP (2022)

Uwzględnione pozycje literatury dobrze reprezentują najważniejsze aktualne osiągnięcia światowe. Są one oparte głównie o uznane czasopisma naukowe i materiały konferencji organizowanych głównie przez IEEE.

Szkoda, że w przeglądzie tym nie znalazły się opracowania polskich naukowców, reprezentujących m.in. takie ośrodki jak Gdańsk, Zielona Góra czy Gliwice. Klasyką dla tych rozważań jest też monografia prof. Marka Hartmana pt. Wielopoziomowe falowniki napięcia z 2006r. powołanie, na którą powinno się znaleźć w opracowaniach młodych naukowców.

4. Wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydata

Cel pracy określony został w podrozdziale 1.2. i zapisany, jako przeprowadzenie badań nad przekształtnikiem SCABC. Badania te obejmują sformułowanie zasady działania, opracowanie algorytmów sterowania i zaproponowanie możliwości wykorzystania badanego rozwiązania przekształtnika w wielopoziomowych układach falownikowych.

W tym samym akapicie Autor napisał, że w pracy *"Przedstawiono równania matematyczne do opisu obwodu. Topologia została zweryfikowana pod kątem zdolności do równoważenia napięcia na trzech połączonych szeregowo kondensatorach. Opracowano system sterowania i zbudowano eksperymentalną konfigurację, aby zweryfikować tę koncepcję."* Te zdania są niezwykle ważne, a zwłaszcza część dotycząca zdolności do równoważenia napięć na trzech połączonych ze sobą kondensatorach, gdyż wskazują one na

rozwiązywany przez Doktoranta problem badawczy. Szkoda, że nie sformułował go bezpośrednio, uzupełniając np. o osiągnięcia związane z własnością eliminacji składowej prądu źródła DC o częstotliwości 100Hz.

Na kolejnej stronie wymienionego rozdziału, w sposób dobrze uporządkowany, podane są cele dysertacji, na które składają się:

- 1) Przegląd i analiza opracowanych topologii sterowania napięciem szeregowo połączonych kondensatorów i ogniw DC.
- 2) Opracowanie i analiza układu SCABC: jego zasad działania, trybów pracy oraz podstaw sterowania.
- 3) Opracowanie modeli symulacyjnych i przebadanie ich w wybranych trybach pracy.
- 4) Opracowanie algorytmów sterowania oraz dobór elementów układu do urządzenia eksperymentalnego SCABC.
- 5) Zaprojektowanie i opracowanie układu eksperymentalnego dla wybranych konfiguracji urządzenia SCABC z falownikiem NPC.
- 6) Przeprowadzenie badań eksperymentalnych z wykorzystaniem opracowanego stanowiska laboratoryjnego.

Przedstawione cele są zgodne z praktyczną organizacją badań oraz porządkiem pracy doktorskiej. Cele te Autor dokładnie zrealizował w kolejnych rozdziałach dysertacji. W każdym z rozdziałów zamieszczał krótkie podsumowania, w których odnosił się do uzyskanych wyników i przedstawiał własne opinie. Umiejętność redakcji takich cząstkowych ocen dobrze świadczy o Autorze, który samodzielnie potrafi interpretować i wyjaśniać zjawiska.

W rozdziale siódmym Autor całościowo przedstawił swoje opinie. Szczegółowo wymienił zrealizowane cele, w czym całkowicie podzielam jego opinie.

5. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Zastosowane metody badawcze to ogólnie przyjęte sposoby postępowania podczas realizacji prac badawczych, określane czasami jako warsztat badawczy:

- a) studia literaturowe składające się z przeglądu bibliograficznego, analiza przypadków i formułowanie oceny w zakresie stanu wiedzy,
- b) formułowanie własnych koncepcji,
- c) badania modelowe i prace symulacyjne zakończone oceną i określeniem sposobu odniesienia ich do rzeczywistych wyników,
- d) projekt, budowa, uruchomienie i walidacja stanowiska badawczego,
- e) wykonanie badań, analiza wyników,
- f) formułowanie wniosków.

Wymienione metody badawcze realizowane były w poszczególnych rozdziałach pracy doktorskiej:

Ad.a) rozdział pierwszy,

Ad.b) w podstawowym zakresie przedstawione zostało w zgłoszeniach patentowych wykazanych w na stronie VII, a w ocenianej pracy znajdują się w rozdziałach 3÷6,

Ad.c) rozdziały trzeci, czwarty, piąty i szósty,

Ad.d) podrozdział 4.3 i 5.3.3,

Ad.e) podrozdział 4.4 oraz 5.3.3., 6.2.1,

Ad.f) każdy rozdział 1÷6 posiada sformułowane wnioski dotyczące rozwiązywanych kwestii. W rozdziale 7 sformułowane są natomiast wnioski do całej pracy.

6. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Zgodnie z wcześniej przytoczonymi argumentami i stwierdzeniami, pozytywnie oceniam wyniki i umiejętności badawcze Doktoranta w zakresie:

- umiejętności budowania oryginalnych topologii,
- umiejętności formułowania modeli matematycznych,
- opracowania oryginalnych, wielowariantowych algorytmów sterowania,
- budowy stanowiska eksperymentalnego,
- możliwości praktyczne zastosowania wyników,
- samodzielności w formułowaniu wniosków.

Studiując rozprawę, zwróciłem na niektóre szczegóły, których wyjaśnienie wymaga dodatkowych wyjaśnień. Są one zapisane w postaci poniższych uwag problemowych:

- 1) Na rysunku 4.1 odwzorowanie w Simulinku jest nieskorelowane z tabelką i tekstem. W tabelce powinien być podany stan początkowy naładowania poszczególnych elementów pojemnościowych. Na schemacie są narysowane tranzystory IGBT, a w tabelce jest podana rezystancja kanału MOSFET. Dodatkowe rezystory są bez oznaczeń i nie wiadomo jakie przyjmują wartości. Elementy takie jak cewki i kondensatory są chyba wybrane jako idealne. W jakim stopniu wpływa to na wyniki symulacji?
- 2) Brak badań gdy mamy do czynienia ze stałym źródłem wymuszenia asymetrii. Brak badań dla stanów dynamicznych. Brak badań gdy przekształtnik NPC jest włączony. Czy przekształtnik NPC i jego impulsowy charakter poboru prądu nie wpłynie na zachowanie obwodu rezonansowego?
- 3) Jeżeli przy układzie niskonapięciowym Vdc 200V i mocy 2kW prąd balansujący to aż 40A w szczycie na kondensatorze rezonansowym, to jaki poziom tych prądów można by przewidzieć dla przekształtników PV pracujących z napięciem wejściowym 1kV i prądach 100A?
- 4) Przedstawione w rozprawie badania i cele naukowe jasno wskazują na rozwiązywany problem badawczy. Tym niemniej proszę, aby podczas obrony Doktorant jednoznacznie sformułował, jaki jest problem badawczy rozprawy.
- 5) Wyznaczenie sprawności to dość złożone zagadnienie, budzące szereg pytań, a przykładowe to:
 - Czy sprawność nie powinna być wyznaczona w funkcji asymetrii napięć na kondensatorach?
 - Czy można określić straty obwodu rezonansowego?
 - W jakim stopniu przekształtnik NPC, który balansuje się sam z wykorzystaniem własnego algorytmu wpływa na poziom strat?
 - Czy na podstawie wyprowadzonych wzorów można wykreślić charakterystykę strat mocy w obwodzie symetryzującym?

7. Informacja o nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

W ocenianej rozprawie nie dostrzeżono istotnych nieprawidłowości, a przedstawione niżej uwagi dotyczą tylko drobnych uchybień o charakterze edycyjnym.

Uwagi szczegółowe:

- rys. 4.2 Nieczytelny rysunek sterowania
- rys. 4.3 Rysunek zbędny - nie wiadomo, co Autor chciał wyjaśnić przedstawiając ten rysunek
- rys. 5.1 Rysunek nieczytelny, nawet w wersji elektronicznej ma się wrażenie, że jest dużo niepodłączonych sygnałów

Wymienione uwagi nie odgrywają istotnej roli merytorycznej, a recenzent przytoczył je zgodnie z zaleceniami określonymi w umowie recenzji.

8. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Na podstawie przedstawionej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Hachlowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika (obecnie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne) oraz szczegółową wiedzą w zakresie przekształtnikowych układów do wyrównywania napięć w szeregowo połączonych kondensatorach i ogniwach bateryjnych. Realizując prace naukowe dowiódł posiadania umiejętności stosowania różnych metod badawczych. Wykazał, że potrafi poprawnie formułować cele badawcze i prowadzić kompleksowe badania stosując metody takie jak: ocena stanu wiedzy, modelowanie matematyczne, badania symulacyjne i eksperymentalne, interpretacja uzyskanych wyników wraz z formułowaniem własnych wniosków. Świadczy to o posiadaniu wysokich kwalifikacji i **umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.**

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgra inż. Jakuba Hachlowskiego uznać za istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika, a po zmianach wprowadzonych rozporządzeniem Ministra Edukacji i Nauki z dnia 11.10.2022r dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Hachlowskiego do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

